

Sensor magneto-óptico de corriente con supresión de birrefringencia lineal mediante espejo de Faraday

Javier Arroyo Breña, Paloma R. Horche

javier.arroyo.brena@alumnos.upm.es, phorche@tfo.upm.es

Dpto. de Tecnología Fotónica. Universidad Politécnica de Madrid, ETSI de Telecomunicación. Ciudad Universitaria 28040 Madrid, España.

Abstract- Fiber optic sensors have some advantages in subjects related with electrical current and magnetic field measurement. In spite of the optical fiber utilization advantages we have to take into account undesirable effects, which are present in real non-ideal optical fibers. In telecommunication and sensor application fields the presence of inherent and induced birefringence is crucial. The presence of birefringence may cause an undesirable change in the polarization state. In order to compensate the linear birefringence a promising method has been chosen. This method employs orthogonal polarization conjugation in the back propagation direction of the light wave in the fiber. A study and a simulation of an experimental setup are realized with the advantage of a significant sensitivity improvement.

I. INTRODUCCIÓN

La monitorización de la corriente eléctrica es una de las principales tecnologías utilizadas en las instalaciones de generación, y en las cada vez más complejas redes de distribución para facilitar las funciones de control, protección y supervisión. Las compañías eléctricas no pueden permitirse mediciones poco precisas debido al impacto económico que supone, y además necesitan disponer de una información continua del estado de la red mediante la monitorización de múltiples puntos de la misma. A medida que, en relación a la creciente demanda, se elevan los niveles de voltaje y la complejidad de las líneas, también crecen proporcionalmente los inconvenientes de los sensores de corriente convencionales como son el tamaño, el peso, el coste, el ruido inducido electromagnéticamente y la dificultad de instalación.

En la pasada década, el desarrollo de sensores magneto-ópticos mediante el empleo de fibra óptica, ha generado algunas oportunidades y ventajas para dar solución a estos problemas. Los tres efectos magneto-ópticos principales son: el efecto Cotton-Mouton, el efecto Kerr y el efecto Faraday [1,2]. Entre ellos, el efecto Faraday es el más utilizado para su aplicación como sensor de corriente.

Los sensores ópticos presentan ventajas con respecto a los sensores convencionales de corriente eléctrica, ya que, son más compactos y ligeros, su instalación es más sencilla y flexible, son inmunes al ruido electromagnético, ofrecen un amplio rango lineal de medidas sin saturación, reducen la contaminación asociada a los aislantes empleados y posibilitan la monitorización a largas distancias, incorporando todas las ventajas de los sistemas de comunicaciones ópticas y mejorando la sensibilidad.

En el caso de los sensores de fibra óptica basados en el efecto Faraday, la medida de la corriente se realiza a través

de la medida del estado de polarización de la luz (SOP). El principal inconveniente de esta tecnología es la presencia de birrefringencia lineal en la fibra, que como es sabido, es un fenómeno aleatorio y difícil de eliminar. La birrefringencia lineal provoca un desfase entre las dos polarizaciones del modo fundamental afectando al SOP y por tanto, perturba la medida y disminuye la sensibilidad del sensor.

Se han publicado algunos métodos para la supresión de la birrefringencia lineal [3,4]. En este trabajo se describe, a través de una simulación, uno de los métodos más ventajosos, basado en la compensación del desplazamiento de fase de las componentes de onda ortogonales, mediante un reflector que permite la propagación inversa de la onda con las componentes ortogonales conjugadas. Esto mejora la sensibilidad del sensor [5] facilitando su implementación en entornos industriales.

II. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Cuando la luz atraviesa un campo magnético su polarización rota proporcionalmente a la intensidad del campo. El ángulo girado sigue la ecuación:

$$\theta_F = VBI \quad (1)$$

donde I es la longitud de interacción, B la densidad de flujo magnético y V la constante de Verdet que determina las propiedades magneto-ópticas del medio y depende de la longitud de onda.

Este efecto se denomina Efecto Faraday y es el principio básico de funcionamiento de los sensores de fibra óptica para la medida de la corriente. La ecuación (1) predice una rotación θ_F de la polarización directamente proporcional a B , en la longitud de interacción I . Las propiedades básicas del efecto son su alta linealidad y su dependencia con la temperatura y la longitud de onda.

La fig. 1 muestra el principio de funcionamiento del sensor donde una fibra óptica monomodo sirve como elemento magneto-óptico.

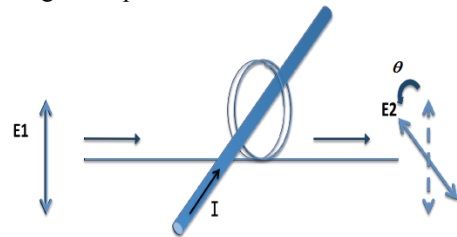


Fig. 1. Rotación de Faraday experimentada por la luz linealmente polarizada cuando la fibra óptica rodea un conductor

El efecto Faraday es un efecto magneto-óptico no recíproco, es decir, la dirección en la que rota la polarización depende de la relación entre la densidad de flujo magnético B y la dirección de propagación. Así, si la onda se propaga en la misma dirección de B , su polarización sufrirá una rotación de ángulo θ_F y si se propaga en dirección contraria, rotará un ángulo $-\theta_F$.

III. SUPRESIÓN DE LA BIRREFRINGENCIA LINEAL

La sílice (SiO_2) tiene una constante de Verdet relativamente baja ($V=3,67 \text{ rad}\cdot\text{T}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$), por lo que para aumentar la sensibilidad del sensor, el elemento conductor se rodea de varias vueltas de fibra en forma de espiras [6].

El enrollamiento de la fibra provoca stress mecánico, y por tanto la aparición de birrefringencia lineal en su núcleo. También puede ser inducida por otros efectos mecánicos (vibraciones) o térmicos, por ello, es importante intentar suprimirla o compensarla. En caso contrario, la polarización lineal de la onda de luz se transforma en polarización elíptica confundiendo con la rotación debida al efecto Faraday y disminuyendo la sensibilidad del sensor [7].

Una posible solución para compensar la birrefringencia lineal se basa en la no reciprocidad del efecto Faraday y en la reciprocidad de la birrefringencia lineal. La fig. 2 muestra el esquema de un sensor de fibra óptica con propagación inversa basado en un espejo de Faraday. Como fuente se utiliza un diodo láser (LD) y el elemento sensor se compone de N vueltas de una fibra óptica monomodo. Excepto el tramo de fibra sensora, el haz se propaga no guiado por lo que es necesario utilizar colimadores ($C1$, $C2$ y $C3$) para enfocar el haz.

El haz colimado por $C1$ está, generalmente, polarizado elípticamente. El polarizador P asegura una polarización lineal inicial 45° , de tal modo, que estableciendo una diferencia de 45° en el azimut, entre el polarizador y el analizador (PBS), se obtiene una respuesta lineal óptima. Tras pasar por el divisor de haz (NBS) el haz se acopla a la fibra sensora, mediante el colimador $C2$. En el tramo de fibra la polarización rota según la intensidad del campo eléctrico por el efecto Faraday θ_F y a esto se le suma la variación de la polarización θ_L inducida por los efectos externos ya mencionados. La comprobación teórica de la supresión de la birrefringencia lineal puede comprobarse a través del cálculo de Jones, que no se ha incluido debido a su extensión [5].

$C3$ enfoca el haz sobre el OCR ("orthoconjugated retroreflector"), que lo refleja y rota su polarización. Al atravesar el OCR, las componentes de campo transversal y longitudinal experimentan una rotación de 45° y debido a la reflexión en el espejo, pasan dos veces por el rotador de Faraday, resultado una rotación $\theta = 90^\circ$. Ahora, las componentes ortogonales atraviesan la fibra de vuelta, pero en el eje complementario. El desplazamiento de fase producido en el camino de ida dentro de la fibra, al ser un fenómeno recíproco, se equaliza en el camino de vuelta e idealmente desaparece la influencia de la birrefringencia lineal, θ_L . En la práctica, la reflexión de la luz mantiene cierta birrefringencia residual. En el mismo trayecto de vuelta, debido a la no reciprocidad del efecto Faraday, la luz experimentará nuevamente una rotación θ_F acumulando un giro doble $2\theta_F$ en el trayecto completo de ida y vuelta, con la consecuente mejora de la sensibilidad.

El haz divergente que sale de la fibra se colima en $C2$ y se enfoca en el NBS que lo refleja parcialmente hacia el divisor

de polarización (PBS). El PBS actúa como un analizador de la polarización dividiendo la señal óptica en dos componentes ortogonales. Cada una de ellas incide sobre un foto-detector distinto, PD1 y PD2. El tratamiento polarimétrico de estas dos medidas proporcionará la rotación de polarización $2\theta_F$ que ha sufrido la luz en función de la corriente que se desea medir.

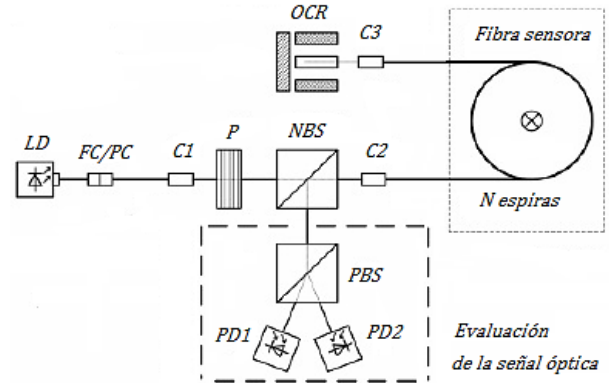


Fig. 2. Esquema del sensor magneto-óptico de corriente con supresión de birrefringencia lineal

IV. CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN DEL SENSOR ÓPTICO DE CORRIENTE

La fig. 3 muestra esquemáticamente el montaje simulado del sensor representado en la fig. 2. Para analizar el comportamiento del sensor, se ha empleado un programa de simulación comercial (Optiwave) que permite analizar tanto sistemas ópticos como eléctricos. Este programa está enfocado a los sistemas de comunicaciones ópticas, por lo que ha sido necesario readaptar algunos componentes o emplear componentes equivalentes. Así, por ejemplo, el espejo de Faraday (OCR) se ha simulado mediante un rotador de Faraday de 90° ("Polarization Rotator 1"), al igual que la rotación de polarización que induce la corriente a medir a través del efecto Faraday. Para este último efecto, con objeto de simplificar el diagrama, se ha colocado un solo rotador con rotación $2\theta_F$, ("Polarization Rotator"). La variación de la polarización asociada a curvaturas en la fibra o birrefringencia lineal inducida θ_L , se simula mediante dos elementos ("Polarization Delay") que introducen un retardo diferente para cada componente ortogonal de polarización, estableciendo así un eje rápido y un eje lento en la fibra, a la ida y a la vuelta. Como se ha analizado en el apartado anterior, y como se comprueba en la simulación, el objetivo fundamental del esquema es compensar dicha birrefringencia.

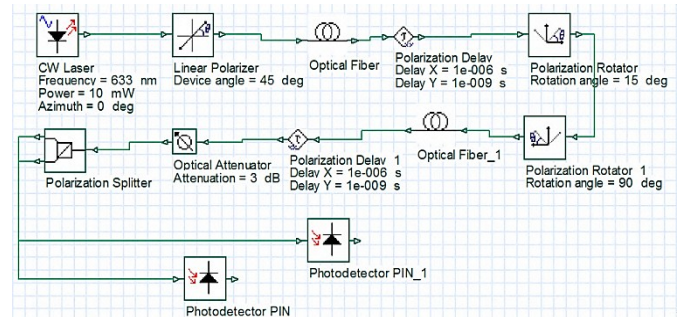


Fig. 3. Esquema de simulación reducido

El láser simulado es un LD emitiendo 10 mW de potencia óptica a una longitud de onda de 633 nm (la luz visible

facilita la mecánica del acoplo de luz entre las diferentes etapas). Una condición indispensable para el buen funcionamiento del sensor es que la fibra propague un único modo a la longitud de onda de uso. Las fibras monomodo (SMF) utilizadas en comunicaciones ópticas son monomodo a partir de una $\lambda_c = 1260$ nm, por lo que hubo que readaptar la fibra simulada ("Optical Fiber") para cumplir esta condición a la longitud de onda de 633 nm. Para ello se han empleado los datos obtenidos de las hojas de características de la fibra SM600 (Thorlabs) con un diámetro de núcleo/ cubierta de 4,3/125 μ m. Con el fin de simular las trayectorias de ida y vuelta por la fibra se han empleado dos tramos de fibra ("Optical Fiber" y "Optical Fiber 1").

Los conectores ópticos se suponen de alta gama tipo FC con pulido PC o APC con el objeto de evitar reflexiones y cambios en la polarización. La tarea de fotodetección se ha simulado mediante fotodiodos PIN, indicados para radiaciones dentro del espectro visible e infrarrojo cercano. Para llevar a cabo la simulación se han utilizado los siguientes valores de atenuación:

- Atenuación de los conectores \rightarrow 0.3 dB
- Atenuación de la fibra \rightarrow 15 dB/km
- Atenuación del NBS \rightarrow 3 dB (pérdida de 1/2 señal)
- Atenuación del OCR \rightarrow 2 dB

V. ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL SENSOR

Para comprobar el funcionamiento del sensor se proponen varios escenarios. El primero supone la ausencia de corriente eléctrica. Tras ello, se ha supuesto una rotación de polarización fija, debida al efecto Faraday, igual a 15° . También, se han realizado dos simulaciones con iteraciones progresivas, con dos rangos de variación angular, entre -90° y 90° y entre -25° y 25° , de tal forma que pueda comprobarse la evolución de la respuesta del sensor en función de la variación de la corriente.

En los diferentes supuestos se facilitan mediciones en distintas localizaciones del montaje, tanto desde el punto de vista de potencia como desde el punto de vista de polarización, de tal forma que se pueda comprobar la coherencia de los resultados obtenidos. Se da también una visión de la esfera de Poincaré y de los parámetros de Stokes (s_0 s_1 s_2 s_3), donde s_0 indica la intensidad del haz óptico, y el resto de parámetros el carácter de la polarización.

A. Escenario sin corriente ($\theta_F = 0^\circ$)

En principio, a la salida del polarizador lineal de 45° la potencia disminuye casi a la mitad y el vector de Stokes es (s_1 s_2 s_3) = (0 1 0).

En este primer escenario ($\theta_F = 0$), la rotación que sufre la luz (90°) es únicamente la impuesta por el OCR. El vector de Stokes en este caso se modifica y pasa a valer (0 -1 0), la polarización sigue siendo lineal, en este caso -45° , como puede observarse en la fig. 4, la cual muestra la medida tomada a la salida del espejo de Faraday.

La potencia óptica que llega a la entrada del divisor de polarización, PBS, es 1 mW. El PBS separa las componentes ortogonales y, al no existir corriente, la potencia de salida para ambas componentes será la misma (0,5 mW).

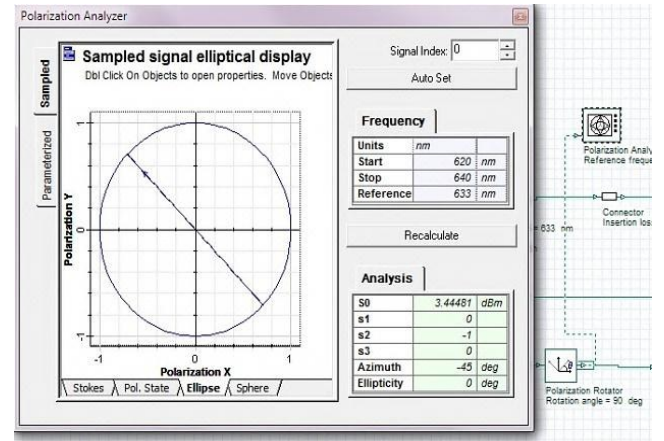


Fig. 4. Polarización a la salida del OCR para un escenario sin corriente

B. Escenario con corriente constante ($2\theta_F = 15^\circ$)

En este segundo escenario, se supone una corriente constante que genera una rotación de Faraday $2\theta_F = 15^\circ$, la mitad de esta rotación será inducida en la polarización cuando la luz viaja hacia el OCR y la otra mitad tras reflejarse en él. A la entrada del PBS, en este caso seguimos teniendo una polarización lineal, pues s_3 sigue siendo nulo como en el escenario anterior. La potencia óptica también se conserva con respecto al escenario anterior y es igual a 1 mW aproximadamente. Sin embargo, podemos ver en la fig. 5 como los parámetros s_1 y s_2 se han modificado, pues debido a la corriente se ha alterado la polarización de la luz, que en ausencia de corriente era lineal de -45° .

Ahora tenemos una polarización lineal de -60° y el vector de Stokes ha pasado de (0 -1 0) a (-0.5 -0.87 0).

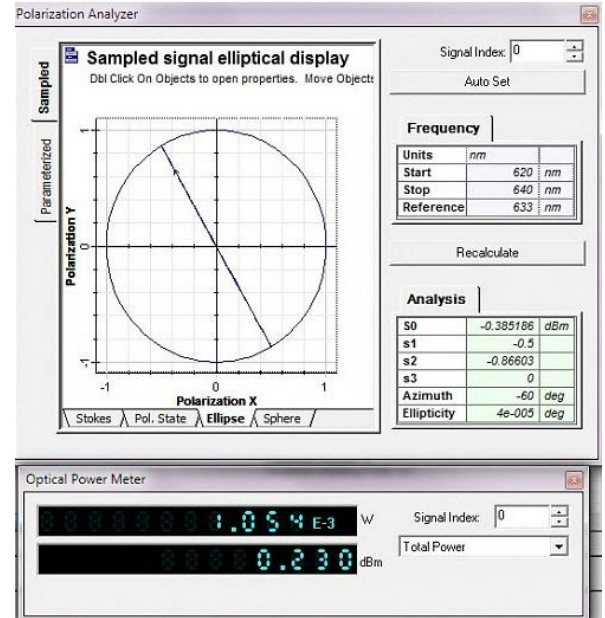


Fig. 5. Polarización y potencia óptica a la entrada del PBS

Esta variación de polarización afecta a la distribución de potencia óptica, que lleva a cabo el PBS entre las componentes ortogonales. Ahora la componente vertical X a la salida del PBS tendrá mayor potencia óptica que la componente horizontal Y, como indica la fig. 6.

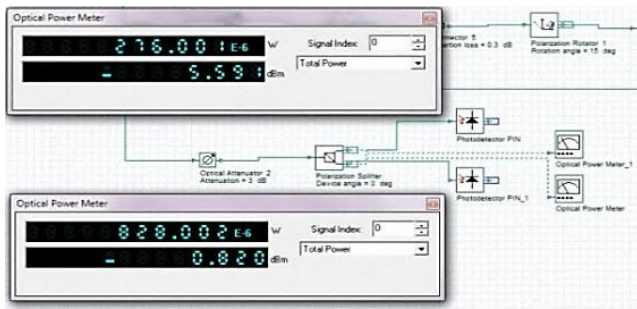


Fig. 6. Potencia óptica a la salida del PBS para cada componente ortogonal

C. Escenario con corriente variable ($-90^\circ < 2\theta_F < 90^\circ$)

Aquí se supone una corriente eléctrica variable, que provocará una rotación también variable en la polarización de la luz. En este primer caso, se supone un ángulo de rotación que varía entre -90 y 90° . Se ha elaborado una gráfica de la respuesta del sensor, mostrada en la fig. 7, mediante una simulación con múltiples iteraciones (46 en total) en la que se ha establecido el mismo salto de ángulo entre cada iteración. De este modo se ha obtenido la respuesta de cada rama a la salida del PBS (línea roja y línea verde) en función del ángulo de rotación inducido por el efecto Faraday. Como se puede observar, esta figura es muy similar a la respuesta de un sensor polarimétrico de corriente ideal. En el siguiente apartado, nos centramos en la zona lineal de la gráfica, ya que esta zona será normalmente la zona de trabajo del sensor, dado su carácter lineal para ángulos pequeños.

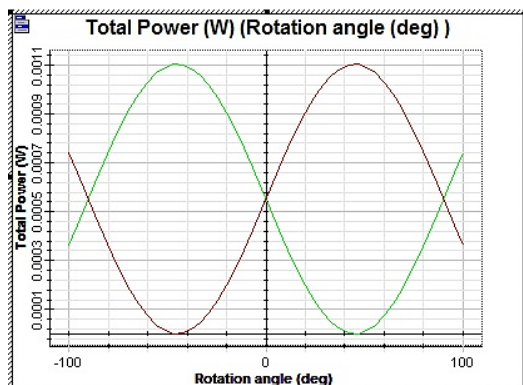


Fig. 7. Respuesta a la salida de cada rama del PBS entre -90° y 90°

D. Escenario con corriente variable ($-25^\circ < 2\theta_F < 25^\circ$)

La fig. 8 resume los resultados obtenidos para ángulos pequeños, en ella se puede apreciar la linealidad de la respuesta del sensor lo que permite asegurar su aplicación en el campo propuesto.

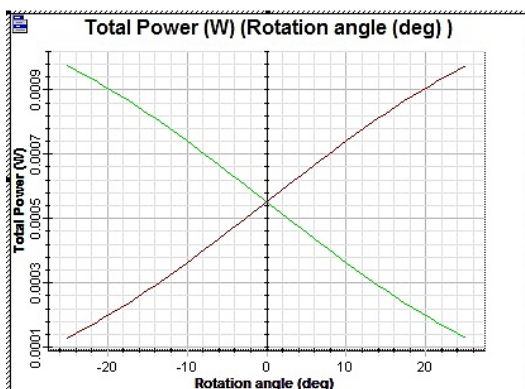


Fig. 8. Respuesta a la salida de cada rama del PBS entre -25° y 25°

En un sensor interesa una respuesta lineal. Se puede observar que para rotaciones, aproximadamente, entre -15° y 15° , la aproximación lineal es totalmente válida. Este escenario se centra en esa zona, ya que será normalmente la zona de trabajo del sensor, dado su carácter lineal para ángulos pequeños.

VI. CONCLUSIONES

El tipo de sensor que se ha descrito representa una manera ventajosa para la medida de corriente DC, AC, y campos magnéticos. El problema de estos sensores es la presencia de birrefringencia lineal latente e inducida. Se ha analizado el esquema de compensación mediante el empleo de un espejo de Faraday, como método y solución prometedora a este inconveniente. Mediante una simulación, se ha comprobado el funcionamiento teórico del sensor y sus componentes para diferentes escenarios, obteniendo una mejora notable de la sensibilidad del sensor, con respecto a otros sensores sin compensación o de lazo cerrado. La configuración simulada es fácil de implementar en la práctica, a expensas de un mayor ajuste de los componentes y procesamiento de señal, proporcionando un sensor estable, inmune a efectos externos y con flexibilidad de instalación. A pesar de las ventajas que tiene la aplicación del espejo de Faraday, existen inconvenientes que limitan su uso, como la dependencia con la temperatura de la constante de Verdet del rotador, por lo que el espejo de Faraday tiene que estabilizarse térmicamente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a LUMIKER Aplicaciones Tecnológicas, S.L., por la financiación parcial de este trabajo a través del proyecto "Estudio de viabilidad del desarrollo de sensores ópticos para la medida de corriente y temperatura" suscrito con la Universidad Politécnica de Madrid.

REFERENCIAS

- [1] M. Gauguitsch, H. Hauser, "Optimization of a magneto-optical light modulator". *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, no.12, p. 2633–2644, 1999.
- [2] A. E. Craig and K. Chang, *Handbook of Optical Components and Engineering*: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [3] K. Kurosawa, "Development of Optical Fiber Current Sensors and Their Applications", *J. Institute of Electrostatic*, Japan, vol. 28, no. 5, 2004, pp. 251-257.
- [4] A. Rose, Z. F. Ren and G. W. Day, "Twisting and annealing optical fiber for current sensors", *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 11, p. 2492 – 2498, Ap.1996.
- [5] P. Drexler and P. Fiala, "Utilization of Faraday Mirror in Fiber Optic Current Sensors", in *Radioengineering*, 17, n° 4, 2008, pp. 101-107.
- [6] M. Aerssens, et al. "Faraday effect based optical fiber current sensors for tokamaks", in *ANIMMA*, 2011.
- [7] S. Zhou and X. Zhang, "Simulation of Linear Birefringence Reduction in Fiber-Optical Current Sensor", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 19, pp. 1568-1570, 2007.